

IR-FEL 高出力運転に向けた cERL ダンプラインの改造とビーム輸送スタディ

RECONSTRUCTION AND BEAM-TRANSPORTATION STUDY OF THE cERL DUMP LINE FOR IR-FEL HIGH-POWER OPERATION

中村典雄^{#, A)}, 谷本育律^{A), B)}, 東直^{A), B)}, 原田健太郎^{A), B)}, 島田美帆^{A), B)}, 内山隆司^{A)}, 野上隆史^{A)}, 上田明^{A)},
長橋進也^{A)}, 帯名崇^{A), B)}, 高井良太^{A), B)}, 下ヶ橋秀典^{A)}, 濁川和幸^{A)}, 加藤龍好^{A), B)}, 阪井寛志^{A), B)}
Norio Nakamura^{#, A)}, Yasunori Tanimoto^{A), B)}, Nao Higashi^{A), B)}, Kentaro Harada^{A), B)}, Miho Shimada^{A), B)},
Takashi Uchiyama^{A)}, Takashi Nogami^{A)}, Akira Ueda^{A)}, Shinya Nagahashi^{A)}, Takashi Obina^{A), B)},
Ryota Takai^{A), B)}, Hidenori Sagehashi^{A)}, Kazuyuki Nigorikawa^{A)}, Ryukou Kato^{A), B)}, Hiroshi Sakai^{A), B)}

^{A)}High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

^{B)}The Graduate University for Advanced Studies (SOKENDAI)

Abstract

A significant FEL pulse energy was successfully generated at the cERL IR-FEL in Burst mode where a macro pulse with about 1 μ s or less is repeated at the maximum frequency of 5 Hz. In the next step, high-power FEL operation should be carried out with energy recovery by increasing electron bunches drastically. However, momentum spread of the electron beam increases due to the FEL-light emission and may cause serious beam loss by exceeding the momentum acceptance of the cERL downstream of the FEL. Therefore, we reconstructed the dump line in Autumn 2020 to increase the momentum acceptance and then performed the beam transportation study in March 2021 to check the new dump line by injecting the beam directly from the injector without passing the recirculation loop. In this paper, we present the reconstructed dump line and the beam transportation study.

1. はじめに

コンパクト ERL (cERL) [1, 2]では、2020 年に赤外 FEL (IR-FEL) が建設されて FEL 光が検出され [3]、2021 年には FEL 出力を増強することに成功した [4]。FEL 光の生成によってビームの運動量広がりが大きくなると、その下流の運動量アクセプタンスを越えることで深刻なビームロスにつながる可能性がある。現在のバーストモード (マクロパルス幅 0.1 - 1 μ s、マクロパルス繰り返し周波数 1-5 Hz) 運転から CW モードなどによる高出力 FEL 運転に移行する場合、放射線の観点から運動量アクセプタンスが最も狭いダンプラインの運動量アクセプタンスを広げてビームロスを抑え込むことが重要になる。そのために、2020 年秋にダンプラインの改造を行った。また、2021 年 3 月には入射部から周回ループを介さずにダンプラインに直接ビームを入射して、改造後初めてのビーム輸送スタディも行った。本発表では IR-FEL 高出力運転に向けた cERL ダンプラインの改造とビーム輸送スタディについて報告する。

2. 運動量アクセプタンス

大電流ビームを伴う高出力 FEL 運転を行う場合に、これまでのバーストモード運転と比べてビームロス率を放射線の観点から十分に抑える必要がある。FEL 光の生成や縦方向の空間電荷効果によって運動量のずれが大きい電子は、分散関数が大きい場所でダクトのアーチャーに当たってロスを引き起こす。

これを回避するには、特に FEL 下流の運動量アクセプタンスが運動量広がりに対して十分に大きくなっている必要がある。Figure 1 に示すように、FEL 下流の主な分散部は、第 2 アークとダンプラインの 2 ケ所である。

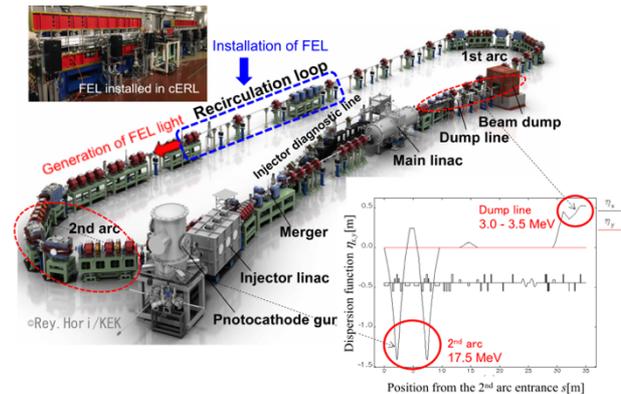


Figure 1: Illustration of the cERL including two dispersive regions, the 2nd arc and dump line, downstream of the IR-FEL with the dispersion functions.

運動量アクセプタンス $(\Delta p/p)_{MA}$ は分散部の分散関数の最大値 $\eta_{x,max}$ とダクトアーチャー (半径) A_x から次のように定義できる。

$$\left(\frac{\Delta p}{p}\right)_{MA} = \frac{A_x}{\eta_{x,max}} \quad (1)$$

2 つの分散部での運動量が異なる場合は、その運動量比をそれに掛ける (あるいは割る) ことで 2 つ

[#]norio.nakamura@kek.jp

の運動量アクセプタンスを比較できる。2 ビームが通る入射およびダンプシケイン部のダクトのアーチャーとビームのバンプ軌道からダクトでビームを削らないためには、入射およびダンプビームと周回ビームとの運動量比は 1:5 (=1/5)がおよそ最大となる。エネルギーで言うと、周回部 17.5 MeV に対してダンプラインでは最大エネルギーは約 3.5 MeV となる。2 カ所の運動量比と分散関数の値を考えると、Table 1 に示すように、改造前ではダンプラインが運動量アクセプタンスを決めていることがわかる。

Table 1: Parameters of the 2nd Arc and the Dump Line Before and After Reconstruction

2 nd arc	
Beam energy	17.5 MeV
Aperture A_x	35 mm
Maximum dispersion $\eta_{x,max}$	1.4 m
Momentum acceptance $(\Delta p/p)_{MA}$	2.50 %
Dump line before reconstruction	
Beam energy	3.53 MeV
Aperture A_x	42.45 mm
Maximum dispersion $\eta_{x,max}$	0.523 m
Momentum acceptance $(\Delta p/p)_{MA}$	8.12 % (1.62 [#] %)
Dump line after reconstruction	
Beam energy	3.53 MeV
Aperture A_x	48.7 mm
Maximum dispersion $\eta_{x,max}$	0.341 m
Momentum acceptance $(\Delta p/p)_{MA}$	14.28 % (2.86 [#] %)

[#] Converted momentum acceptance for comparison with the 2nd arc

改造前でもオプティクス調整でダンプラインの最大分散関数を 0.454 m まで下げることができるが、第 2 アークと比べて運動量アクセプタンスはまだ小さい。ダンプラインでの運動量アクセプタンスを第 2 アーク並みに広げるために、ダンプラインを改造することになった。主な改造点としては、ダンプライン最上流の四極電磁石を 40 cm 上流に移動させることで最大の分散関数を 0.341 m まで下げることと真空ダクトのアーチャーを四極電磁石のボア径(50.1 mm)ぎりぎりまで広げることである。これによって、Table 1 に示すように、ダンプエネルギー約 3.5 MeV に対して、運動量アクセプタンスを第 2 アークよりも大きくすることができる。

3. ダンプラインの改造

前章で述べた運動量アクセプタンスの改善を主目的としてダンプラインの改造が 2020 年秋に行われた。Figure 2 に改造前後のダンプラインの配置・構成を示す。図では改造後のみダンプシケイン電磁石や局所的な鉛の放射線遮蔽が描かれているが、改造

前の図では省略されている。

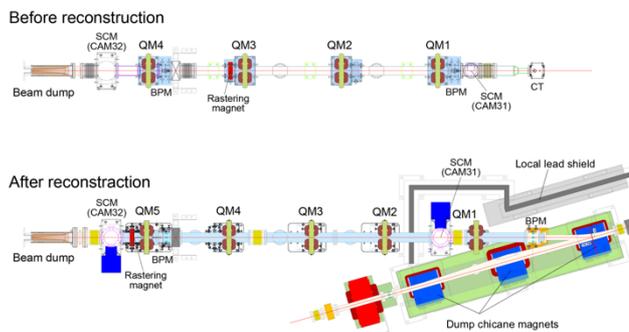


Figure 2: Layout of the cERL dump line before (upper) and after (lower) reconstruction.

主な改造点として、分散関数を下げるためにダンプライン分岐後の最上流の四極電磁石 QM1 を機器の干渉のない範囲まで (40 cm) 上流に移動し、真空ダクトのアーチャーを内半径で 42.45 mm から 47.8 mm まで広げた。また、電磁石に関しては四極電磁石 QM5 を 1 台増やしてビーム調整の自由度を増やした。さらに、大電流運転ではダンプのビームによる局所的な熱負荷を軽減するためにラスタリング[5]を行うが、ラスタリング電磁石 (水平・垂直兼用) を QM5 の直下流に移動して四極電磁石のラスタリング軌道への影響を除いた。真空機器に関しては、ダクトの大部分を新たに製作してアーチャーを広げた他に、排気ポートの移動と追加などを行った。また、モニタについては、下流のビーム位置モニタ (BPM) についてアーチャーを広げたものを製作して QM5 の下流に設置した。さらに、もともとアーチャーが 50 mm の上・下流のスクリーンモニタ (SCM) は移動のみして再利用し、電流モニタ (CT) を撤去した。

全てのダンプライン機器を設置した後で、5 台の四極電磁石の測定を行った。その結果を Fig. 3 に示す。QM3 の垂直方向 -2 mm のずれが設置誤差の中で最大である。今回の改造では既存四極電磁石のボア径ぎりぎりまでダクトを広げたことで、電磁石とダクトのマーヅンがほとんどなかったために、再アライメントはできなかった。それでも、四極電磁石の磁場強度を考えると、設置誤差はビーム軌道調整において大きな問題にはならないことを確認している。

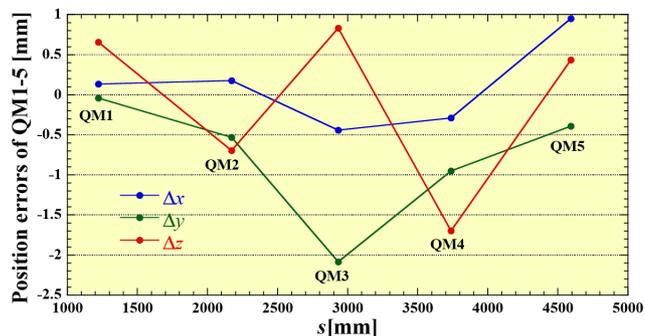


Figure 3: Measurement result of longitudinal (Δz) and transverse (Δx , Δy) position errors of quadrupole magnets QM1-5 at the reconstructed dump line.

4. ビーム輸送スタディ

2021年3月18日にダンプライン改造後初めてのビーム輸送スタディを関連するハードウェアとソフトウェアのチェックも兼ねて行った。Figure 4 にビーム輸送スタディを行ったビームラインとビーム輸送方向を示す。バンチ電荷は 60 pC、主空洞入口でのエネルギーは 5 MeV、ML1 空洞による on-crest 加速後のエネルギーは 10 MeV で、電子銃から ML1 後まで FEL 運転と全く同じパラメータ値を使用した。通常は ML2 空洞でも加速して 17.5 MeV にするところ、このスタディでは、ML2 で減速することでビームエネルギーを 5 MeV と 3.5 MeV に調整した。

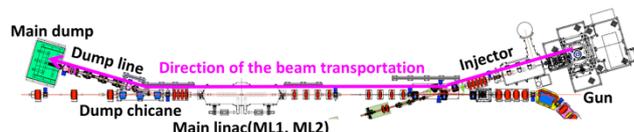


Figure 4: Layout of the used beam line and the beam direction in the beam-transportation study.

4.1 環境磁場の測定

ビーム輸送スタディ前に、ダンプラインに最も近いダンプシケインの第 2 偏向電磁石からの漏れ磁場の測定を運転前の 2021 年 1 月末に行った。第 2 偏向電磁石の周囲の大部分は磁気遮蔽のために厚み 5 mm の鉄板で囲み、囲めない部分に近いダンプラインのダクトには厚さ 1 mm のミュンメタルを 2 巻した。それでも、ビームエネルギー 3.5 MeV に対応する励磁電流に対して第 2 偏向電磁石周辺 50cm 程度の範囲で平均して垂直磁場 0.3 G 程度が残り、蹴り角約 -1.25 mrad に相当することがわかった。一方で、ビーム輸送スタディ時には SuperKEKB の運転があり、それによる環境磁場が加わっていたので、cERL 運転終了後にシケインの第 2 偏向電磁石をオフにした状態で SuperKEKB 運転による環境磁場も測定した。その結果、SuperKEKB の運転によってダンプラインには垂直方向で約 0.5 G、水平方向で約 0.3 G のおよそ様な磁場が生じていることがわかった。

4.2 5 MeV ビーム輸送試験

最初に現在の FEL の調整運転と同じ入射エネルギーである 5 MeV のビームをダンプラインまで輸送させた。ML2 は on-crest の RF 位相で 5 MeV 減速運転を行った。まずは、ダンプラインの四極電磁石は全てオフにしてその上流のダンプシケインの第 1 偏向電磁石を使って上流のスクリーンモニター CAM31 (配置は Fig. 2 参照) で中心位置になるようにビーム軌道を調整した。その時、ビームは下流の CAM32 で Fig. 5(a) のように中心から水平に約 13.5 mm、垂直に約 8.9 mm ずれて現れた。このずれは、主に SuperKEKB による環境磁場の影響と考えて大きな矛盾がなかった。入射部とダンプ部の電流モニター (ファラデーカップ) から、ビーム輸送効率はおおよそ 100% であった。

その後、Fig. 5(b) のように QM1-5 とサブコイル (水平・垂直軌道のステアリングコイル) を励磁し

て、ビームプロファイルと位置の調整を行った。CAM32 でのビームサイズはおおよそ水平・垂直共に 2-2.5 mm に調整した後に、ラスタリング電磁石の調整を行った。ラスタリングはこの電磁石を使ってダンプ部で広がった円内を走査するように水平・垂直磁場を高速で変化させる。Figure 6(a) に示すように、ラスタリングによるビーム位置の動きを CAM32 で確認し、ラスタリング電磁石と CAM32 までの距離とダンプ入口までの距離の比からダンプでの走査範囲を求めることができる。Figure 6(b) にダンプ付近の配置を示す。CAM32 で $\phi 5.6 - 5.9$ mm の円を走査しているの、ダンプ入口では $\phi 18 - 19$ mm の円を走査していることになる。

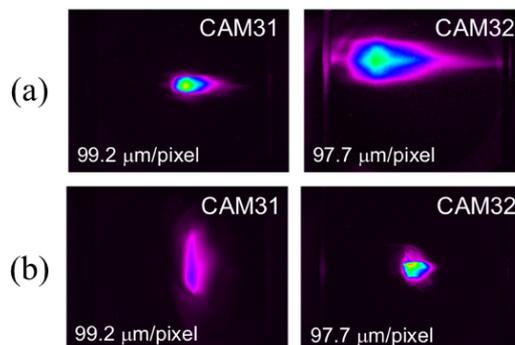


Figure 5: Beam profiles at CAM31 and CAM32 for the 5-MeV beam. (a) QM1-5 were turned off and the beam orbit was tuned by the dump chicane so as to be the position center at CAM31. (b) QM1-5 and their steering coils were excited to tune the beam sizes and positions.

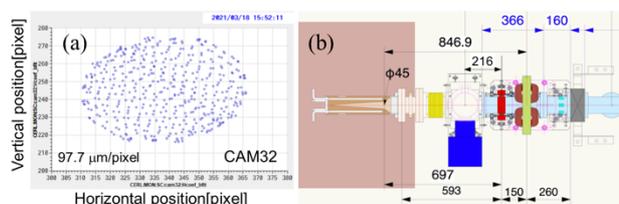


Figure 6: (a) Beam position movement by the rastering magnet at CAM32 and (b) layout near the rastering magnet and the beam dump.

4.3 3.5 MeV ビーム輸送試験

次にエネルギー回収できる最大のダンプエネルギーである 3.5 MeV まで下げてビーム輸送試験を行った。このエネルギーでは、ML2 空洞による on-crest 位相での 6.5 MeV 減速運転を最初に行い、次に RF 位相を 30 度ずらした off-crest 位相での 6.5 MeV 減速運転を行った。後者は FEL で運動量広がりが大きくなった場合を模擬したものである。

ML2 において、(a) 6.5 MeV の on-crest 減速をする場合と (b) RF 位相 30 度ずらして 6.5 MeV の off-crest 減速した場合のビーム調整後の CAM31, 32 でのビームプロファイルを Fig. 7(a),(b) にそれぞれ示す。2 つのプロファイルを比較してわかるように、(b) の場合は off-crest 減速のために、(a) の場合に比べて運動量広がりが増えてビームサイズも分散関数を通してか

なり大きくなっていることがわかる。ビーム調整では、ダンプ部でおよそ 2 mm の水平・垂直のビームサイズになるようにした。Figure 8(a),(b)は、2つの場合の CAM32 におけるラスティング試験の結果を示している。CAM32 で $\phi 6.6 - 6.8$ mm の円を走査しているの、ダンプ入口では $\phi 21 - 22$ mm の円を走査していることになる。ビーム位置は ML2 空洞による on-crest, off-crest 減速にかかわらず期待通りにほぼ同じ範囲を走査できていることがわかる。

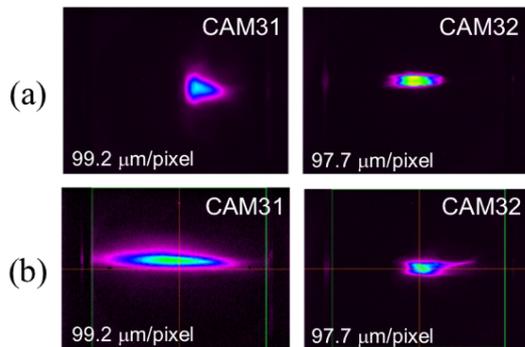


Figure 7: Beam profiles at CAM31 and CAM32 for the 3.5-MeV beam with (a) on-crest and (b) off-crest deceleration by the ML2 cavity.

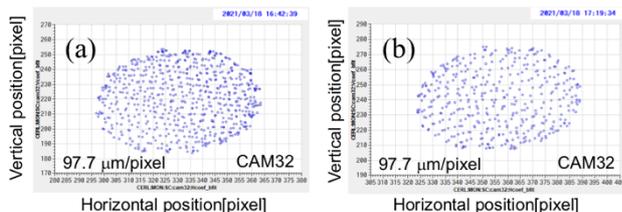


Figure 8: Beam position movement by the rastering magnet at CAM32 with (a) on-crest and (b) off-crest deceleration by the ML2 cavity.

Figure 9 には ML2 空洞による off-crest 減速の場合の ML2 からのダンプまでのオプティクスとビームサイズのシミュレーション結果を示す。ML1 空洞までを FEL 運転と同じ GPT で行われた結果[6]を初期分布として用い、ML1 後は ELEGANT によるシミュレーションでつないだ。ただし、ELEGANT の場合は、縦方向の空間電荷効果とコヒーレント放射の影響は考慮されているが、横方向の空間電荷効果は含まれていない。シミュレーションの結果、運動量広がり は 3.4%(RMS)で CAM31 での水平ビームサイズは 9.6 mm(RMS)になった。測定では水平ビームサイズは 11.8 mm で、分散関数 0.28 m を仮定すると運動量広がり は 4.2%となる。この違いは、横方向空間電荷の効果やシミュレーションとスタディでの電磁石や空洞などの様々な誤差によるものと考えられる。しかしながら、このように運動量広がり が大きくビームが広がっていても、ダンプラインの 5 台の四極電磁石によって分散関数を抑えつつ CAM32 あるいはダンプ部でビームサイズを絞ってラスティングを含めたビーム輸送が問題なくできることを示すことができた。

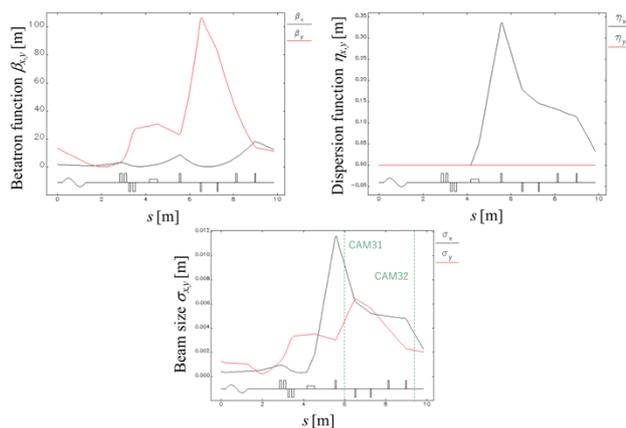


Figure 9: Betatron and dispersion functions (upper) and beam sizes (lower) along the dump line by simulation.

4.4 ビームロス測定

ビーム輸送スタディではビームロス計測も同時に行った。計測はダンプライン上流 (QM1 直下流) と下流 (QM5 直上流) の 2カ所に設置されたロスモニタ[7]を使用した。ロスモニタ検出部は、CsI 結晶 (10 mm×10 mm×25 mm) を蛍光体にして大面積の光電子増倍管を付けたもので、どちらもビーム進行方向右側でダクトと同じ高さにあって、ダクトから 10 - 20 cm 離れたところに置かれた。蛍光体の窓はダンプラインのダクト側に向けられている。Figure 10 に 2つのロスモニタの配置を示す。

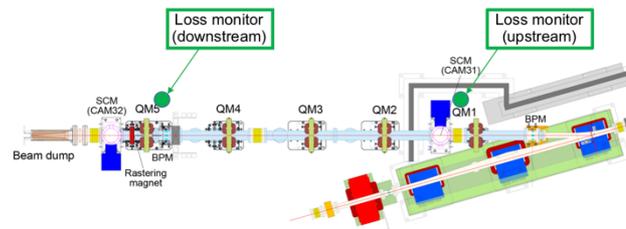
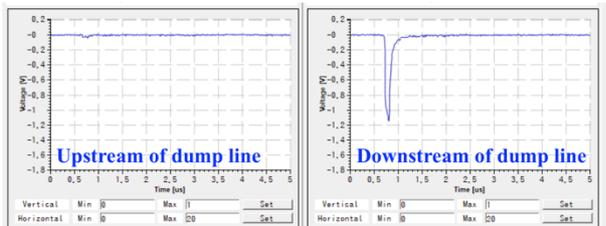


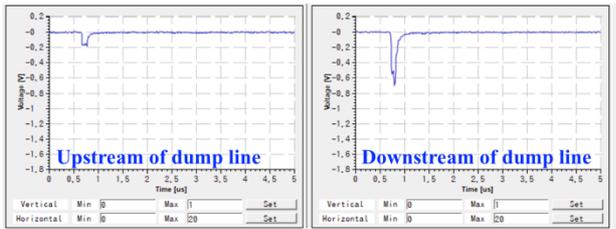
Figure 10: Layout of two loss monitors installed at the reconstructed dump line.

Figure 11 にビーム輸送スタディ中に観測されたビームロスモニタからの信号を示す。下流ロスモニタで観測された信号は、主にビームがダンプに廃棄した際に生じる後方散乱による放射線の影響が無視できないと考えられるので、今後はその影響を避けるように下流モニタの設置位置を見直すこととした。一方、上流モニタからの信号を見ると、ビームサイズが大きくなると増えていくことが確認できる。特に、運動量広がり が大きい 3.5 MeV ビームの off-crest 減速運転の場合に顕著に信号強度が大きくなることがわかった。一方、ラスティングについては今回の走査振幅の範囲ではロスモニタ信号に大きな増大は見られず、影響は限定的であった。下流モニタの配置を変更した上で、今後は下流でのロスも確認する必要がある。また、今回は時間的な制約もあってビームロスを改善させるようなビーム調整スタディまで行うことはできなかった。今後の課題としたい。

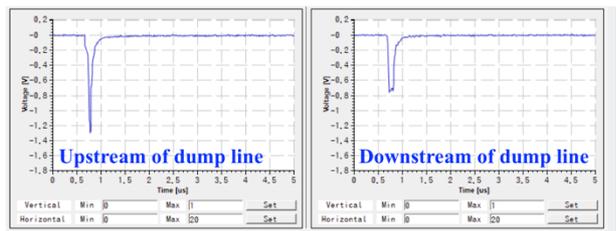
(a) 5 MeV, rastering off



(b) 3.5 MeV, rastering off



(c) 3.5 MeV, off crest, rastering off



(d) 3.5 MeV, off crest, rastering on

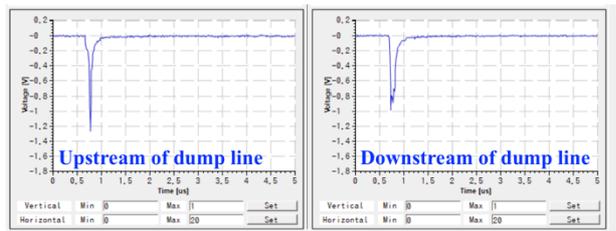


Figure 11: Signals from the two beam loss monitors for (a) the 5-MeV beam with rastering off, (b) the 3.5-MeV beam with rastering off, (c) the 3.5-MeV beam with off-crest deceleration and rastering off and (d) the 3.5-MeV beam with off-crest deceleration and rastering on.

5. まとめ

今回行った高出力 FEL 運転に向けたダンプライン改造とビーム輸送スタディについてまとめる。

- FEL 光生成などによる運動量広がりが増大によって高出力 FEL 運転では分散のある場所で深刻なビームロスが起こる可能性がある。cERL ではダンプラインが運動量アクセプタンスを決めている。
- アパーチャの拡大と最上流四極電磁石の上流移動でダンプラインの運動量アクセプタンスは 70%以上改善し、第 2 アーク部のアクセプタンスよりも大きくできる。
- 運動量アクセプタンスの改善に向けてより詳細なダンプライン機器の配置と仕様を決定し、ダ

ンプライン改造を 2020 年秋に実行した。

- ビーム輸送スタディは 2021 年 3 月に行われ、5 MeV および 3.5 MeV ビームに対してダンプラインでのビーム輸送を試験した。ビームは環境磁場やラスタリングの影響下でも大きな問題なく輸送できた。
- ただし、運動量広がり大きい時にビームロスの増加が見られるので、高出力 FEL 運転に向けてそのようなロスの低減を目的とするビーム調整スタディを今後の課題としたい。

謝辞

多くの cERL 共同開発研究者の協力と助言に感謝致します。また、本発表の一部は、NEDO「高輝度・高効率次世代レーザー技術開発」プロジェクトによる成果に基づいています。

参考文献

- [1] M. Akemoto *et al.*, “Construction and commissioning of the compact energy-recovery linac at KEK”, Nucl. Instrum. Methods **A877** (2018) 197-219.
- [2] N. Nakamura, R. Kato, T. Miyajima, M. Shimada eds., “cERL 成果報告書”, KEK Report 2017-5, March 2018.
- [3] R. Kato *et al.*, “cERL を用いた中赤外自由電子レーザーの開発とその光発生実験”, The 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Japan, Sep. 2-4, 2020, THOT07.
- [4] H. Sakai *et al.*, “cERL を用いた中赤外 FEL の開発と FEL 発振”, The 18th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Japan, Aug. 9-12, 2021, MOPOA04.
- [5] K. Harada *et al.*, “cERL のラスタリングシステム”, Proceedings of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Chiba, Japan, Aug. 8-10, 2016, pp.585-588.
- [6] O. Tanaka *et al.*, “コンパクト ERL における中赤外自由電子レーザー運転のための入射器の最適化”, The 18th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Japan, 2021, THOB03.
- [7] H. Sagehashi *et al.*, “cERL におけるインターロック用高速ロスモニタシステムの開発”, Proceedings of the 12th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Tsuruga, Japan, Aug. 5-7, 2015, pp.1215-1218.